Archive of SID

مجله مهندسی مکانیک، شماره پیاپی ۹۱، جلد ۵۰، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۹، صفحه ۹-۱۵

طراحی و بررسی تجربی نازل افزایش‌دهنده سرعت در مقطع آزمون تونل‌باد سرعت پایین

مصطفی امیری‌طیبی کارشناس، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
مسعود میرزایی* استاد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
غلامحسین پوریوسفی استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
علیرضا دوست‌محمودی کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

یکی از روش‌های مرسوم برای افزایش سرعت جریان، استفاده از نازل در مسیر آن است. در این مقاله، به منظور افزایش سرعت جریان در تونل باد سرعت پایین و انجام آزمایش در محدوده سرعت‌های بالاتر، بهترین پروفیل نازل با توجه به محدودیت‌هایی مانند مساحت ورودی نازل، طول نازل و سرعت ورودی جریان، ارزیابی می‌شود. در این راستا، برای بررسی تأثیر متغیرهایی مانند مساحت خروجی نازل، سرعت خروجی جریان، موقعیت نقطه عطف پروفیل نازل، یکواختی جریان خروجی و طول موثر اتاق‌آزمون، میدان جریان در داخل نازل به روش عددی شبیه‌سازی شده و پروفیل مناسب برای نازل طراحی می‌شود. در انتها، با ساخت نازل طراحی‌شده و نصب آن در داخل تونل باد، کیفیت جریان به روش تجربی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. طبق نتایج به‌دست آمده، سرعت جریان آزاد در داخل اتاق آزمون حدود ۳۰٪ افزایش پیدا کرده و میزان غیریکنواختی جریان تا ۱٪± کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: نازل، تونل‌باد، سرعت جریان، طراحی عددی، بررسی تجربی.

Design and Experimental Investigation of a Nozzle in the Test Section of a Low Speed Wind Tunnel

M. Amiri Tayebi Aerospace Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
M. Mirzaei Aerospace Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
G. Pouryoussefi Aerospace Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
A. Doostmahmoudi Aerospace Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

One of the conventional ways to increase velocity of a fluid flow is using a nozzle in stream wise. In this paper, in order to increase the flow velocity in a low speed wind tunnel, and to carry out experiments at higher velocities. An optimal nozzle profile, by considering constraints such as the nozzle inlet cross section, inlet velocity, and nozzle length has been designed using computational fluid dynamics. Design variables were the nozzle inlet cross section, outlet velocity, the turning point of the nozzle profile, the uniformity of the outlet flow and the effective length of the test section. The performance of the designed nozzle was experimentally investigated. According to the results, the velocity increased by 13 m/s and the uniformity of the flow decreased by ±1%.

Keywords: Nozzle, Wind tunnel, Flow velocity, Computational design, Experimental investigation.

۱- مقدمه

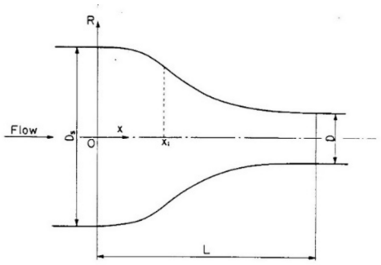
یکی از مهم‌ترین اجزای تونل باد، نازل آن می‌باشد که قبل از اتاق آزمون قرار دارد. جریان خروجی از نازل به مقطع آزمون می‌رسد و این جریان بایستی شرایط لازم برای شبیه‌سازی جریان واقعی را در اطراف مدل داشته باشد. وظیفه اصلی نازل تبدیل انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی و شتاب دادن به جریان هوا و همچنین کاهش غیریکنواختی سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن می‌باشد[۱]. نازل وظیفه کاهش گردابه‌ها و نوسانات محوری توربولانس موجود در جریان را برعهده دارد[۲]. شکل و اندازه نازل تنها سرعت خروجی از آن را بیان نمی‌کند بلکه میزان غیریکنواختی آنرا نیز مطرح می‌کند[۴و۳]. طراحی نازل باید به گونه‌ای انجام پذیرد که در نزدیکی مقاطع ورودی و خروجی نازل، گرادیان فشار معکوس وجود نداشته باشد[۵]، همچنین جدایش جریان در لایه مرزی اتفاق نیافتد. در نازل، نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی هرچه بزرگتر باشد شدت اغتشاشات جریان خروجی از آن نیز کمتر خواهد بود[۶]. در ارتباط با نازل و طراحی آن، تحقیقات تجربی و عددی وسیعی توسط پژوهشگران مختلف در سطح دنیا انجام

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: mirzaei@kntu.ac.ir
تاریخ دریافت: ۹۷/۰۲/۱۹
تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۱۵

www.SID.ir

Archive of SID

شده است. ساده و متداول‌ترین روش طراحی نازل توسط مورل[۱ و ۷] پیشنهاد شده که براساس نظریه جریان پتانسیل انجام شده است. فانگ و همکارانش[۸ و ۹] نیز جریان در نازل را به صورت عددی و تجربی، ارزیابی نموده و با اندازه‌گیری‌های توزیع فشار و توزیع سرعت و مقایسه نتایج آن با نتایج عددی، نشان دادند که طرح ارائه شده آنها کاربردی است. به علاوه، منشادی و همکاران[۱۰] به بحث کنترل گرادیان فشار در نازل تونل باد پرداخته و تأثیر زبری مصنوعی را بر توزیع در دیواره نازل، بررسی و آزمایش نمودند. نتایج آنها نشان می‌داد که تأثیر نوار زبری بر توزیع فشار و اغتشاش‌های جریان، قابل ملاحظه می‌باشد. گالن و مارسیک[۱۱] تأثیر تغییر نسبت سطح مقطع را در نازل یک تونل باد بررسی نموده و کیفیت جریان هوا را در خروجی نازل مورد بررسی قرار دادند. یکی از روش‌های طراحی پروفیل نازل، استفاده از دو منحنی درجه سومِ ورودی و خروجی (با نقطه عطف X_i) است (شکل ۱).



شکل۱- طرحواره نازل با پروفیل دوضابطه‌ای[۳]

معادله این دو منحنی که به روش راوس معروف است، از قرار زیر می‌باشد[۱۲]:

$$0 \le X \le X_i \quad \frac{R}{D/2} = \frac{D_S}{D} - \left[\frac{D_S}{D} - 1\right]\frac{(X/L)^3}{(X_i/L)^2}$$
$$X_i \le X \le L \quad \frac{R}{D/2} = 1 + \left[\frac{D_S}{D} - 1\right]\frac{(1-X/L)^3}{(1-X_i/L)^2} \qquad (۱)$$

شکل۲- تونل باد مدار باز مکنده موضوع مقاله $D = 30cm$

در این مقاله، به منظور دستیابی به محدوده بالاتر سرعت جریان آزاد در تونل باد آزمایشگاه آیرودینامیک دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی (شکل ۲)، با استفاده از روش دوضابطه‌ای راوس و در نظرگرفتن محدودیت‌هایی مانند مساحت ورودی نازل و طول نازل (متغیرهای ورودی)، پروفیل مناسب نازل برای برای نصب در اتاق آزمون به صورت عددی شبیه‌سازی می‌شود. در انتها، با ساخت نازل طراحی‌شده و نصب آن در داخل تونل باد، کیفیت جریان در نازل به صورت تجربی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- روش تحقیق

تونل باد مورد مطالعه در این مقاله، تونل باد آزمایشگاه آیرودینامیک دانشکده مهندسی هوافضای دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی است که در این پژوهش به منظور افزایش سرعت جریان در اتاق آزمون آن، نازلی برای آن طراحی و ساخته می‌شود. این تونل از نوع مدار باز مکنده می‌باشد (شکل ۲). طول اتاق‌آزمون اولیه آن ۶۱cm با سطح مقطع مربعی به ضلع ۳۰cm است. برای این منظور، عواملی مانند طول نازل به مقدار ۳۰cm و مساحت ورودی آن (۳۰cm × ۳۰cm) به عنوان محدودیت‌های طراحی در نظر گرفته شده‌اند. همچنین عواملی مانند سطح مقطع خروجی جریان از نازل و موقعیت نقطه عطف پروفیل دوضابطه‌ای به عنوان متغیرهای ورودی در طراحی نازل مورد مطالعه قرار گرفته است.

روش تحقیق مورد استفاده در پژوهش حاضر، مبتنی بر سه بخش طراحی مفهومی، طراحی عددی و بررسی تجربی می‌باشد.

۲-۱- طراحی مفهومی

محدودیت و قیود طراحی از قرار زیر در نظر گرفته شده است:

- با توجه به اینکه قبل از نصب نازل در اتاق آزمون، بیشینه سرعت جریان آزاد $۳۰m/s$ می‌باشد، با نصب و اضافه شدن اجزایی مانند نازل دوم، اتاق آزمون کوچک و دیفیوزر جدید، مجموع ضرایب افت فشار برای کل تونل باد افزایش می‌یابد و درنتیجه سرعت جریان ورودی به نازل افزایش‌دهنده سرعت (نازل دوم) در محدوده m/s۲۰-۱۵ درنظرگرفته می‌شود.
- طول نازل دوم با توجه به محدودیت طول اتاق آزمون تونل باد موضوع پژوهش، حداکثر ۳۰cm می‌تواند در نظر گرفته شود.
- مساحت خروجی نازل باید به قدری باشد که به جادهی مدل در اتاق آزمون جدید و انجام آزمایش بر روی آن لطمه نزند. لذا کوچکترین سطح مقطع خروجی نازل، مربعی با ضلع ۱۸cm فرض می‌شود.
- طراحی نازل باید به گونه‌ای باشد که طول موثر اتاق آزمون کوچک، برای جادهی مدل و انجام آزمایش بر روی آن، با احتساب تغییرات الگوی جریان در بالادست و پایین‌دست مدل، کافی باشد. اگر فرض کنیم مدلی که در اتاق آزمون قراردارد یک مکعب با ابعاد به طول A باشد، این مدل علاوه بر مرزهای فیزیکی خود، اثراتی در بالادست و پایین دست جریان اعمال می‌کند. این اثرات (ناحیه

www.SID.ir

Archive of SID

دنباله) تا محدوده حدود ۴ برابر A در پایین‌دست مدل تخمین زده می‌شود. به این محدوده، طول موثر اتاق آزمون گفته می‌شود.

با توجه به قیود مطرح شده، عوامل زیر به عنوان متغیرهای طراحی درنظر گرفته شده است:

- با توجه به اینکه هرچه مساحت خروجی نازل کمتر شود، سرعت جریان خروجی بیشتر می‌شود، لذا برای رسیدن به بیشترین سرعت خروجی باید مساحت خروجی نازل کاهش یابد. در عین حال، نباید به جادهی مدل در اتاق آزمون کوچک لطمه وارد نماید. به عبارت دیگر، ابعاد مدل نصب شده در اتاق آزمون کوچک نمی‌تواند از یک حد معینی کوچکتر باشد. در این پژوهش، ابعاد مقطع اتاق آزمون کوچک، مربعی با طول ضلع مابین cm ۱۵-۱۹ با گام cm ۱ تغییر می‌کند تا تأثیر این متغیر بررسی شود.
- تغییرات موقعیت نقطه عطف پروفیل نازل دارای تأثیر محسوسی بر کیفیت جریان خروجی از نازل و طول بیشینه موثر اتاق آزمون می‌باشد. در این راستا، برای هر مقطع خروجی ثابت، نقطه عطف در سه موقعیت مختلف ٪ ۱۸ و ٪۲۵ و ٪۳۲ (نسبت به طول نازل) تغییر می‌کند تا تأثیر این متغیر بررسی گردد. در ادامه روند طراحی، پس از بدست آوردن رابطه تأثیرات دو متغیر مقطع خروجی و موقعیت نقطه عطف پروفیل نازل بر یکدیگر، تغییرات موقعیت نقطه عطف بر الگوی جریان خروجی از نازل، در محدوده وسیع‌تری (٪۱۰ تا ٪۹۰) مورد مطالعه قرار می‌گیرد.
- غیریکنواختی جریان آزاد به صورت زیر تعریف می‌شود:

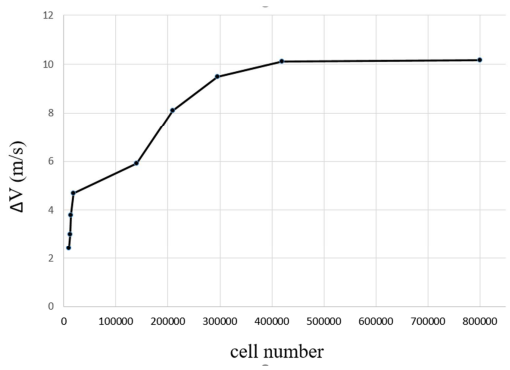
$$R = \frac{U - U_{avg}}{U_{avg}} \times 100 \qquad (۲)$$

این پارامتر اطلاعات ارزشمندی از کیفیت جریان در طول یک خط یا یک سطح را ارائه می‌دهد. هرچه عدد غیریکنواختی بزرگتر باشد به معنای اختلاف بیشتر سرعت موضعی جریان با سرعت میانگین در طول مرجع مشخص‌شده می‌باشد و نشانه‌ای از کیفیت پایین‌تر جریان آزاد خواهد بود؛ و هرچه این عدد به صفر نزدیک‌تر باشد به معنای اختلاف کم سرعت موضعی با سرعت میانگین و کیفیت بالاتر جریان آزاد است.

- سرعت جریان خروجی از نازل که افزایش آن هدف اصلی این پژوهش می‌باشد.

۲-۲- طراحی عددی

در این بخش، معادله تعداد زیادی از پروفیل‌های نازل با متغیرهای مختلف (مساحت مقطع خروجی و نقاط عطف مختلف) ترسیم و برای شبیه‌سازی عددی جریان در نازل، یک اتاق آزمون کوچک و یک دیفیوزر در پایین‌دست آن، جمعا به طول cm ۴۵ به انتهای آن متصل می‌شود. این پروفیل‌ها به صورت دوبعدی و متقارن، توسط نرم‌افزار SolidWorks 2016 رسم می‌گردد. برای شبکه‌بندی میدان جریان از نرم‌افزار ICEM CFD 18.1 استفاده شده است که در شکل ۳ مشاهده می‌شود (با تعداد حدود ۴۰۰ هزار سلول).

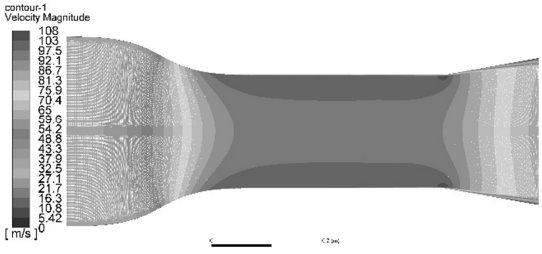


شکل۳- تغییرات اختلاف سرعت ورودی و خروجی با تغییر تعداد شبکه محسباتی (استقلال از شبکه)

سپس با کمک نرم‌افزار Ansys Fluent 18.1 جریان در داخل تونل باد شبیه‌سازی عددی می‌گردد (شکل ۴). در ادامه، کیفیت جریان خروجی از نازل (کیفیت جریان در اتاق آزمون کوچک) از لحاظ سرعت جریان خروجی، غیریکنواختی جریان و طول موثر اتاق آزمون کوچک، مورد مقایسه قرار می‌گیرد تا بهترین پروفیل نازل انتخاب گردد. مدل توربولانسی انتخاب شده جهت شبیه‌سازی عددی از نوع Transition SST می‌باشد.

شرایط مرزی حل عددی از قرار زیر ذرنظر گرفته شده است:

- دلیل متقارن بودن شکل نازل، تحلیل عددی به صورت دو بعدی و نیمه درنظر گرفته شده و محور میانی نازل به صورت axisymmetric می‌باشد.
- ورودی نازل به صورت Velocity-inlet بوده و سرعت ورودی جریان هوا m/s ۳۳ و شدت اعتشاشات ٪۰/۵ درنظر گرفته شده.
- خروجی هوا از پخش‌کن به صورت Outflow می‌باشد.
- برروی دیواره، شرایط No-slip shear condition اعمال شده است.



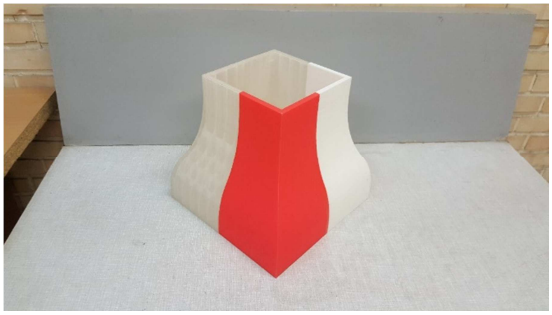
شکل۴- کانتورهای سرعت جریان در مجموعه نازل و اتاق آزمون و دیفیوزر

www.SID.ir

Archive of SID

۳-۲- بررسی تجربی

در این بخش به‌منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و ارزیابی نهایی کیفیت جریان در اتاق آزمون کوچک، با ساخت نازل دوم (به همراه اتاق آزمون و دیفیوزر کوچک) و نصب آن در اتاق آزمون تونل باد، کیفیت جریان در اتاق آزمون کوچک به صورت تجربی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای ساخت پروفیل نازل که از طراحی عددی بدست آمده، از پرینتر سه‌بعدی استفاده شده تا انحنای مطلوب با دقت قابل قبول تولید شود (شکل ۵). همچنین، اتاق آزمون و دیفیوزر کوچک از جنس پلکسی‌گلس با ورق‌هایی به ضخامت mm ۲۰ ساخته شد که در شکل ۶ مشاهده می‌شود. برای اندازه‌گیری هرچه دقیقتر سرعت جریان در اتاق آزمون کوچک، از مانومتر دیجیتال دقت بالا (با تفکیک‌پذیری 1pa) مدل KIMO-MP210 و لوله پیتوت استاتیکی L شکل استفاده شد.

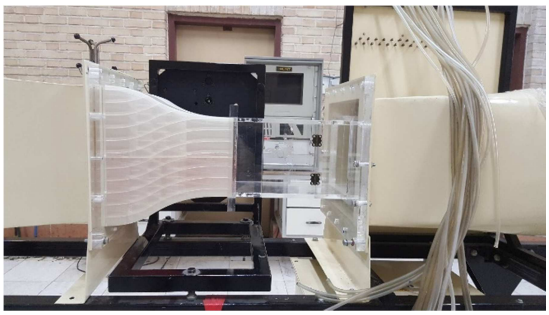


شکل۵- نازل ساخته شده با استفاده از پرینتر سه‌بعدی

شکل ۶- مجموعه نازل، اتاق‌آزمون و پخش‌کن ساخته شده خارج از تونل باد، به صورت عمودی

۳- بررسی نتایج

در این قسمت، تأثیر تغییرات دو متغیر موقعیت نقطه عطف پروفیل نازل و همچنین مساحت مقطع خروجی نازل، بر کیفیت جریان داخل اتاق آزمون کوچک، بررسی می‌گردد. در انتها، نتایج حاصل از طراحی نازل به کمک شبیه‌سازی عددی با نتایج تست تونل باد، مقایسه و ارزیابی می‌شود.



الف

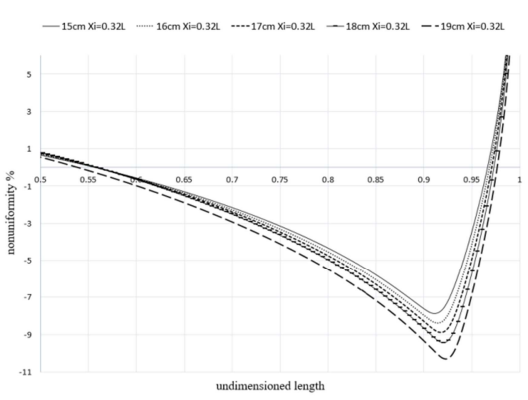
ب

شکل ۷- مدل نهایی ساخته و نصب شده در تونل باد

همانطور که پیش‌تر بیان شد، پروفیل‌هایی با نقاط عطف در سه موقعیت مختلف ٪۱۸ و ٪۲۵ و ٪۳۲ (نسبت به طول نازل) و مساحت‌های مختلف مقطع خروجی (مربع‌هایی با طول ضلع مابین cm ۱۵-۱۹ با گام $1cm$ شبکه‌بندی و تحلیل عددی شده است. نتایج نشان می‌دهد که در یک موقعیت نقطه عطف ثابت، هرچه مساحت خروجی کوچکتر باشد، یکنواختی جریان در طول خط مرجع عمودی در نیمه اتاق آزمون کوچک، به طور مداوم افزایش می‌یابد و با بررسی بیشتر و مقایسه نتایج، مشاهده می‌شود که این فرآیند برای تمامی موقعیت‌های مختلف نقطه عطف نیز برقرار است. به عبارت دیگر، تأثیر متغیر مساحت مقطع خروجی نازل مستقل از موقعیت نقطه عطف می‌باشد (شکل ۸).

www.SID.ir

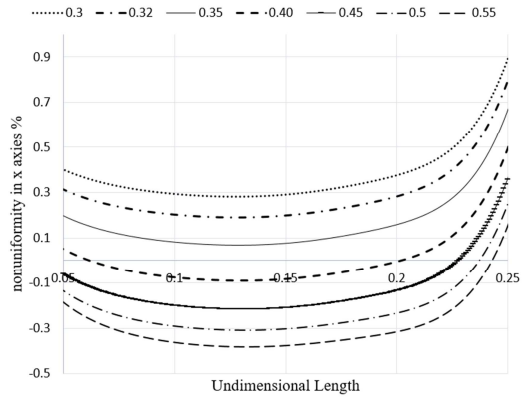
Archive of SID



شکل ۸- غیر یکنواختی بر روی خط عرضی میانه اتاق آزمون پروفیل‌ها با مساحت‌های خروجی و نقاط عطف مختلف

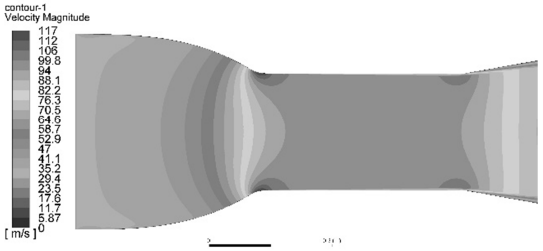
مطابق نتایج شکل ۸، هرچه مساحت خروجی نازل کوچکتر شود با توجه به افزایش سرعت خروجی نازل و همچنین افزایش یکنواختی جریان، پروفیل مناسب‌تر خواهد بود. یعنی پروفیل با طول ضلع خروجی cm ۱۵ مطلوبترین پروفیل به نظر می‌آید. اما با توجه به قیدی که در قسمت طراحی مفهومی مطرح شد، مساحت خروجی نازل باید به قدری باشد که به جادهی مدل و انجام آزمایش بر روی آن لطمه نزند. لذا ضلع خروجی نباید از cm ۱۸ که حداقل مساحت لازم برای آزمایش بر روی مدل است، کوچکتر شود. بنابراین، پروفیلی که در نهایت انتخاب شده است، پروفیلی با مساحت خروجی با ضلع cm ۱۸ می‌باشد.

در این مرحله، برای انتخاب پروفیلی با بهترین موقعیت نقطه عطف، با سطح مقطع خروجی انتخاب شده (cm۱۸) تحلیل‌های بیشتری انجام شده است. برای این منظور، موقعیت نقاط عطف مختلف در محدوده ٪۱۰ تا ٪۹۰ تغییر می‌کند تا اثرات ناشی از تغییرات آن مطالعه شود (شکل ۹).



شکل ۹- غیر یکنواختی بر روی خط طولی میانه اتاق آزمون پروفیل‌ها با مساحت خروجی $18\ cm$ و نقاط عطف مختلف

همانگونه که در شکل ۹ مشاهده می‌شود با نزدیک‌تر شدن موقعیت نقطه عطف به انتهای نازل، بطور کلی مقدار غیریکنواختی در وسط اتاق آزمون کمتر می‌شود (مطلوب) و درصد پوشش بیشینه مساحت اتاق‌آزمون در محدوده غیریکنواختی کمتری قرار می‌گیرد (مطلوب). اما دو مشکل بوجود می‌آید؛ اول آنکه بدلیل تشدید گرادیان فشار در انتهای نازل و ابتدای اتاق‌آزمون، احتمال وجود جدایش جریان در ابتدا و انتهای اتاق‌آزمون بالا می‌رود (شکل ۱۰) و در نتیجه تلفات انرژی افزایش می‌یابد و متعاقباً سرعت جریان در اتاق‌آزمون کاهش می‌یابد.



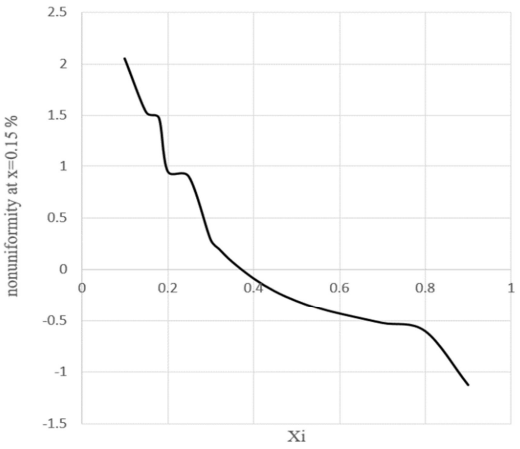
شکل۱۰- کانتور سرعت در پروفیل $D = 18\ cm, x_i = 0.90L$ و شروع جدایش جریان در ابتدا و انتهای اتاق آزمون

از سوی دیگر، با نزدیک‌تر شدن موقعیت نقطه عطف به خروجی نازل، طول مطلوب (قابل استفاده) اتاق آزمون کاهش می‌یابد. در حقیقت، مشاهده می‌شود که طولی از اتاق‌آزمون که در محدوده غیریکنواخت قرار می‌گیرد بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر، درصد پوشش طول موثر اتاق‌آزمون از کل اتاق آزمون که cm۳۰ بود به یک محدوده کمتر در حدود ٪۵۰ آن تبدیل می‌شود. باید توجه داشت که با در نظرگرفتن اثرات دنباله مدل، الگوی جریان اطراف مدل و ناحیه دنباله علاوه براینکه در محدوده فیزیکی خود مدل تأثیرگذار است، در بالادست و پایین‌دست مدل نیز اثراتی دارد که از اینرو نمی‌توان اتاق آزمونی محدود به طول فیزیکی مدل تنها، طراحی کرد و باید طول اتاق آزمون طراحی شده اثرات بالادستی و پایین‌دستی مدل را هم دربر بگیرد. برای این منظور، با درنظرگرفتن سرعت میانگین مرجع ثابت برای هر پروفیل، خطی از ابتدا تا انتهای اتاق‌آزمون (در فاصله cm ۶ دیواره) مدنظر در نظرگرفته شده و سرعت در نقاط مختلف آن خط ثبت شد و مقدار غیریکنواختی جریان در اتاق آزمون کوچک با توجه به اختلاف سرعت‌های موضعی و سرعت میانگین مرجع، در یک نمودار رسم گشته‌اند (شکل ۹). با توجه به تعریف پارامتر طول موثر اتاق‌آزمون و با توجه به ابعاد حدودی اتاق‌آزمون جدید، اگر مکعبی به طول cm ۵ در اتاق آزمون جدید آزمایش شود، پروفیل مطلوب باید حداقل در فاصله cm ۵ تا cm ۲۵ ابتدای اتاق‌آزمون از غیریکنواختی کمی برخوردار باشد. و همچنین غیریکنواختی آن دراین فاصله نباید از ٪۰/۵ بیشتر باشد. با محدودیت‌های تعیین‌شده، انتخاب پروفیل نازل باید از

www.SID.ir

Archive of SID

داخل قسمت محدود شده نمودار انجام شود. درنتیجه، مطابق شکل ۹ پروفیل‌هایی با موقعیت نقاط عطف ٪۳۰ تا ٪۶۰ مجاز می‌شوند. ملاحظه شد که پروفیل‌های خارج از این محدوده، طول موثر اتاق آزمون کمتر از cm ۲۰ دارند. در این مرحله، از بین پروفیل‌های مجازشده با موقعیت نقاط عطف مختلف، غیریکنواختی جریان در وسط اتاق‌آزمون کوچک در نمودار جداگانه‌ای رسم شده است که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. در این شکل، محل تقاطع منحنی بدست آمده با محور طولی، موقعیت نقطه عطفی است که کمترین غیریکنواختی جریان را در وسط اتاق آزمون دارد. با بدست آوردن معادله خط مابین نقطه عطف ٪۳۵ و ٪۴۰ و تعیین شیب و تقاطع آن با محور طولی، نقطه عطف بهینه درحوالی $x_i = 0.373L$ بدست می‌آید.

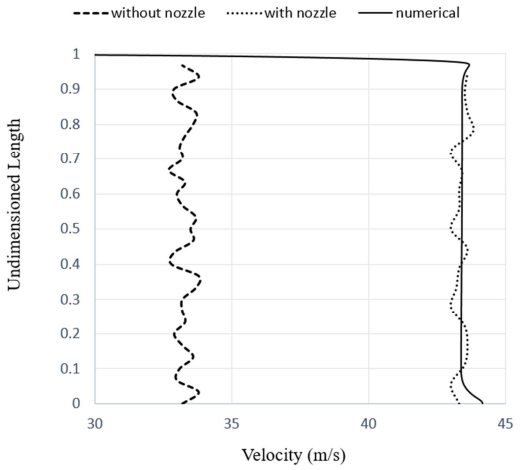


شکل ۱۱- غیریکنواختی بر روی خط طولی میانه گذرنده از مرکز اتاق آزمون در پروفیل‌های مختلف

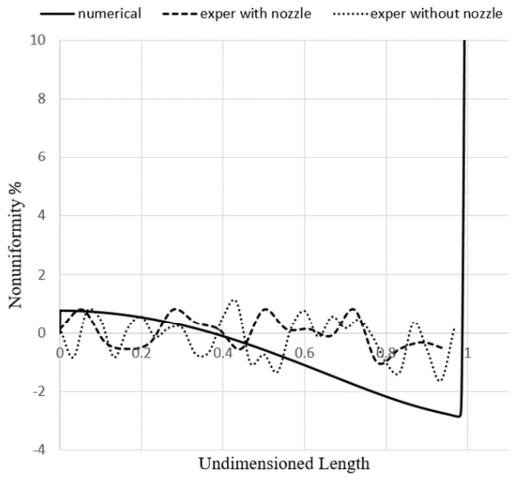
پس از نهایی شدن طراحی عددی و تعیین بهترین پروفیل نازل و ساخت و نصب مجموعه آن در تونل باد، بررسی‌های تجربی کیفیت جریان آزاد بر روی آن انجام گرفت. برای اندازه‌گیری میزان غیریکنواختی جریان در اتاق آزمون کوچک و مقایسه آن با نتایج طراحی عددی، سرعت در فواصل معین cm ۰/۵ در عرض اتاق آزمون اندازه‌گیری شد و با نتایج عددی و همچنین پروفیل سرعت، پیش از نصب مجموعه نازل افزایش‌دهنده سرعت، مقایسه و ارزیابی شد (شکل-۱۲). نتایج نشان می‌دهد که با نصب مجموعه اتاق‌آزمون، دیفیوزر و نازل جدید در تونل‌باد، سرعت جریان آزاد از m/s ۳۳ تا میزان m/s ۴۳ افزایش می‌یابد که رشد حدود ٪۳۰ را نشان می‌دهد. به علاوه، در شکل ۱۳ منحنی غیریکنواختی جریان در سه حالت تحلیل عددی، اندازه‌گیری تجربی در حالت پیش از نصب مجموعه نازل و پس از نصب آن، با یکدیگر مقایسه و ارزیابی شد. مطابق نتایج، غیریکنواختی تا میزان ٪۱± کاهش یافته‌است.

همانگونه که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است، به طور کلی تطابق خوبی میان نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشات تونل باد مشاهده می‌شود که حاکی از صحت روش عددی به‌کاررفته در شبیه‌سازی جریان می‌باشد.

برای تست اعتبارسنجی تجربی، به دلیل اطمینان از صحت ابزار و تست، آزمایشات حداقل پنج بار تکرار شده است که با توجه به اینکه ماهیت جریان داخل نازل رفتار تصادفی ندارد کافی می‌باشد. در تست‌های تجربی، با توجه به دقت ابزار مورد استفاده مذکور و شرایط آزمایش‌ها، عدم قطعیت اندازه گیری سرعت، حداکثر $\pm m/s$۱ تخمین زده می‌شود.



شکل ۱۲- پروفیل سرعت در سه حالت تحلیل عددی، تست تجربی در حالت قبل از جادهی نازل و تست تجربی در حالت با نازل جدید



شکل ۱۳- غیریکنواختی در سه حالت تحلیل عددی، تست تجربی در حالت قبل از جادهی نازل و تست تجربی در حالت با نازل جدید

www.SID.ir

Archive of SID

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به منظور دستیابی به محدوده بالاتر سرعت جریان آزاد در تونل باد، با استفاده از روش دوضابطه‌ای راوس و در نظرگرفتن محدودیت‌هایی مانند مساحت ورودی نازل و طول نازل (متغیرهای ورودی)، پروفیل مناسب نازل برای برای نصب در اتاق آزمون به صورت عددی شبیه‌سازی می‌شود. همچنین، با ساخت نازل طراحی‌شده و نصب آن در داخل تونل باد، کیفیت جریان در نازل به صورت تجربی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. طبق نتایج به‌دست آمده، سرعت جریان آزاد در داخل اتاق آزمون کوچک حدود ٪۳۰ افزایش پیدا کرده و میزان غیریکنواختی جریان تا ٪۱± کاهش یافته است.

در انتها پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آتی، در طراحی سیستم افزایش‌دهنده سرعت، میزان زاویه دیفیوزر بعد از اتاق آزمون کوچک، مورد ارزیابی قرار بگیرد.

۵- نمادها

R	فاصله عمودی دیواره نازل نسبت به محور آن
D_i	قطر وردی
D	قطر خروجی
L	طول نازل
X_i	نقطه مشترک دو منحنی دیواره نازل
U	سرعت موضعی جریان در راستای مرج
U_{avg}	سرعت میانگین جریان در راستای مرجع

۶- مراجع

[1] Morel T., Design of Two-Dimensional Wind Tunnel Contractions, ASME J. Fluids Eng. 119, pp.371-378, 1997.

[2] Almeida O; Miranda FC; Ferreira Neto O; Saad FG . Low Subsonic Wind Tunnel – Design and Construction. J Aerosp Tecno, Manag, DOI: 10.5028/jatm.v10.716. 2018.

[3] Hoghooghi H and NiliAhmadabadi M, Optimization of a Subsonic Wind Tunnel Nozzle With Low Contraction Ratio Via Ball-spine Inverse Design Method, Journal of Mechanical Science and Technology 30. 2059-2067 .2016.

[4] Panda M and Samanta A, Design of Low Cost Open Circuit Wind Tunnel - Case Study, Indian Journal of Science and Technology, Vol 9(30), DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i30/99195, August 2016.

[5] Pope A. and Goin, K.L., Low Speed Wind Tunnel Testing, 2nd Edition, A Wiley-Intersience Publication, John Wiley and Sons, Inc, 1984.

[6] M. A. Ardakani, Low Speed Wind Tunnel Design Principles and Application, K.N. Toosi University of Technology, Iran, Tehran, Spring 2009.

[7] Morel T., Comprehensive Design of Axi-Symmetric Wind Tunnel Contraction, ASME J. Fluids Eng. 97, pp. 225-233, 1975.

[8] Fang F., Chen J.C., Hong Y.T., Experimental and Analytical Evaluation of Flow in a Square-to-square Wind Tunnel Contraction, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 89. Pp. 247-262, 2001.

[9] Fang F., A Design Method for Contractions With Square End Sections, ASME J. Fluids Eng. 99, pp. 454-458, 1997.

[10] Dehghan D., Mirzaei M., Ghorbanian K., Control of Pressure Gradient in the Contraction of a Wind Tunnel. World Academi of Science, Engineering and Technology 1: 4–29, 2009.

[11] Callan J, Marusic I, The Effect of a Changing Aspect Ratio Through a Wind Tunnel Contraction. AIAA 2000-2461, 2000.

[12] Rouse H., Hassan M.M., Cavitation-free Inlets and Contractions, Mech. Eng., Vol. 71, pp. 213- 416, 1949.

www.SID.ir